

# 東アジア夏季降水量の将来変化における初夏と晩夏の違いについて

\*遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、尾瀬智昭  
気象研究所

## 1. はじめに

東アジアの夏の気候は、梅雨降水帯の出現で特徴づけられる。梅雨降水帯は、アジアモンスーンに伴う下層の湿潤気流と中緯度上空の偏西風により形成され、5月から7月にかけて東アジアを北上する (Kodama 1993; Wang and LinHo 2002; Wang et al. 2008)。この降水帯は偏西風の影響で東西に伸びており、一般的なモンスーンによる降水と異なり、陸上だけでなく日本を含む海洋上でも多くの雨をもたらす。偏西風の役割として、大陸から暖気を移流して上昇流を励起すること、低気圧性擾乱を誘導することなどが指摘されている (Sampe and Xie 2010)。

CMIP マルチモデルによる温暖化予測では、東アジアや南アジアの夏季モンスーン降水量は増加傾向が予測されていて、増加率は他のモンスーン地域よりも大きいことが示されている (Kitoh et al. 2013; Wang et al. 2020)。温暖化に伴う大気成層の安定化により全球的にはモンスーン循環は弱化する一方、アジアではユーラシア大陸の昇温により大陸・海洋間の温度差が増加してモンスーン気流強化の作用が働くために降水量増加率が大きくなると考えられている (Endo and Kitoh 2014; Endo et al. 2018; Wang et al. 2020)。

気象研究所では高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM) を用いた温暖化予測を長年実施してきた。この手法のメリットとして、モデルの高解像度化により台風や梅雨などの極端気象現象を高精度で再現できること、結合モデルに含まれる海面水温 (SST) バイアスの影響を回避して地域気候を精度良く再現できることなどがある (Kitoh et al. 2016)。高解像度 MRI-AGCM による温暖化予測実験では、東アジアでは極端降水はロバストに増加するが夏季の平均降水量はモデルや実験設定の違いにより将来変化の不確実性が大きいことが示されている (Endo et al. 2012; Kusunoki 2018; Ose 2019)。

本研究では、MRI-AGCM3.2 (Mizuta et al. 2012)

を用いてアンサンブル温暖化実験を行い、夏季東アジアの平均降水量の将来変化と不確実性について調べた。また、追加のモデル実験を行い将来変化の要因を検討した。本原稿は Endo et al. (2021) に基づくものである。詳細はこちらを参照していただきたい。

## 2. モデルの実験設定

MRI-AGCM3.2 の 60km 格子 (TL319) 版を用いた。現在実験では観測 SST をモデルに与えた。将来実験では、不確実性を考慮した2種類のアンサンブル実験を行った。1つ目は SST アンサンブル実験 (28 メンバー、Yoshimura 積雲) で、CMIP5 マルチモデルの 28 種類の SST 偏差パターンを観測 SST に加えてモデルに与えた。2つ目は物理・SST アンサンブル実験 (12 メンバー) で、3種類の積雲対流スキームを用いて CMIP5 マルチモデルの代表的な 4 種類の SST 偏差パターン (Mizuta et al. 2014) を観測 SST に加えてモデルに与えた。ここで SST 偏差は、熱帯平均が 2.74°C (CMIP5 平均値) になるように規格化されている。いずれも RCP8.5 シナリオに基づく 21 世紀末の予測である。

将来変化のメカニズム理解のため、MRI-AGCM3.2 (Yoshimura 積雲) による要因分析実験を行った。実験リストを表 1 に示す。HP 実験は現在実験、HF 実験は将来実験 (21 世紀末、RCP8.5 シナリオ) で全ての強制を含む。モデルに与える SST は、HP 実験では観測値、HF 実験では CMIP5 平均 SST 偏差 (図 1) を観測値に加えたものである。CMIP5 平均の SST 偏差の特徴として、赤道太平洋の中部～東部の昇温ピークや太平洋中緯度の大きな昇温などが挙げられる。さらに、Exp1～Exp4 の実験を行い将来変化 (HF-HP) を 4 つの要因に切り分けた。すなわち、要因①: 温室効果ガス (GHG) 増加 (Exp1-HP)、要因②: SST 一様昇温 (Exp2-HP)、要因③: 熱帯 SST パターン変化 (HF-Exp3)、要因④: 北半球中高緯度 SST パターン変化 (HF-Exp4) である。ここで Exp1

では、SST 固定で GHG のみ増加させるため、温室効果が陸上でのみ働くことになり、陸面昇温の影響が現れる。

### 3. 将来変化

2 種類のアンサンブル予測実験における降水量の将来変化を図 2 に示す。夏季平均では東アジアでは概ね増加傾向だが、月毎の違いや地域性が見られる。6 月は梅雨降水帯が強化してやや南下することがロバストな傾向として予測されており、梅雨降水帯の北側には降水量変化が小さいゾーンが分布する。7 月と 8 月は中国北部とその近海（日本海等）における増加は共通の傾向である。一方で、7 月は梅雨降水帯の変化傾向のばらつきが大きく、8 月は太平洋で降水量変化が小さい。

### 4. 要因分析

要因分析実験における降水量の変化を図 3 に示す。CMIP5 平均 SST 偏差をモデルに与えて得られた将来変化（HF-HP; 図 3a-d）は SST アンサンブル実験を平均した将来変化（図 1a-d）とほぼ同じ特徴を示す。要因別実験から、6 月の将来変化で見られる梅雨降水帯の強化と南下は、SST 一様昇温と熱帯 SST パターン変化の影響を大きく受けていることが分かる。陸面昇温は梅雨降水帯の季節的北上を早めるため、上記要因の一部を相殺する。一方で 7 月と 8 月の将来変化は、GHG 増加による陸面昇温と中高緯度 SST パターン変化の影響を大きく受けている。このように、初夏と晩夏ではこれら 4 つの要因のバランスが変化している。

次に、梅雨降水帯のバックグラウンドとして重要な日本上空の偏西風の変化を図 4 に示す。偏西風の将来変化には明瞭な季節性がある。すなわち、偏西風は初夏に強化して南下する一方で晩夏はやや弱化している。要因別実験によれば、SST の一様昇温と熱帯パターン変化は、夏を通して偏西風を強化して南下させる方向に働く。一方で、陸面昇温と SST 中高緯度パターン変化は、晩夏を中心に影響が現れて上記要因を相殺して上回る。これらの重ね合わせの結果、日本付近の偏西風は初夏と晩夏で異なる変化傾向を示す。ここで、SST パターン変化の日本への影響は熱帯起源と中高

緯度起源で異なる点は興味深い（図 4e, f）。このような偏西風変化の季節性は上述の降水量変化の季節性と密接に関連していると考えられる。

全球的な観点では、対流圏中上層の偏西風は温暖化により極側シフトが予測される地域/季節が多く、東アジア初夏の偏西風の赤道側シフトは例外的な温暖化応答である。これに関して Hirahara et al. (2012) は、温暖化による大気成層の安定化により北西太平洋の上昇流が弱まるためにチベット高気圧の季節的北上が弱まるためと説明している。本研究の SST 一様昇温および熱帯パターン変化の実験では、北西太平洋の上昇流が弱化しており（図略）、彼らの説明と矛盾しない。Zhou et al. (2022) は、温暖化により偏西風が赤道側シフトする地域/季節の特徴として、①偏西風の存在緯度が赤道に近いこと、②偏西風の風速が弱いことを挙げ、アジア・太平洋域の初夏、北米・大西洋域の晩冬、東太平洋域の冬季～春季がこれに該当するとしている。

偏西風の変化と関連して地上温度の変化を図 5 に示す。将来変化では、晩夏の中緯度で昇温量が大きく（図 5a）、このために南北の温度傾度が弱化して、温度風の関係から上空の偏西風が弱化すると考えられる。GHG 増加による陸面温度は、中高緯度では通年で大きく昇温するが、特に 7～8 月に昇温が大きい（図 5b）。SST 昇温にも明瞭な季節性があり、8 月～9 月の中緯度で昇温が大きい（図 5c）。昇温のピーク時期はそれぞれの気候値のピーク時期とほぼ一致しており、その結果、表面温度の季節サイクルが強化されている。この特徴は SST で顕著に見られる。

### 5. まとめ

東アジアの夏季降水量および関連する大気循環場の将来変化について、60km 格子 MRI-AGCM によるアンサンブル温暖化予測実験に基づいて調べた。東アジアの夏季降水量は、概して増加傾向だが月毎および地域的な変動が大きい。具体的には、6 月は梅雨降水帯が強化してやや南下、7 月と 8 月は東アジアの大陸北部とその近海で降水量が増加する傾向はメンバー間で一致していた。一方で、7 月は梅雨降水帯の予測ばらつきが大きく、8 月は太平洋で降水量変化が小さい。

MRI-AGCM を用いて将来変化の要因分析実験を行った。初夏の降水量変化では、SST 一様昇温および熱帯 SST パターン変化の影響が支配的で、これに伴う水蒸気増加および上層偏西風の強化・南下が重要な役割を果たす。一方で晩夏になると、陸面昇温および中高緯度 SST の大きな昇温の影響も重要になる。これらの要因は、上層偏西風や下層モンスーンを変化させ、初夏の要因影響を打ち消して上回る。これら相反する要因の結果として、7月の梅雨・メイユ降水帯の温暖化応答は6月よりも小さく、7月の変化傾向はシミュレーション間でばらつきやすいと考えられる。

本研究では、温暖化による夏季東アジア気候への影響として、既存の研究で指摘されてきた主に熱帯を起源とする要因 (Kitoh and Uchiyama 2006; Kosaka and Nakamura 2011; Hirahara et al. 2012; Inoue and Ueda 2012) に加えて、大陸昇温や中高緯度 SST 昇温の役割について明らかにした。端的に言うと、前者 (熱帯起源の要因) は梅雨的な大気循環の強化をもたらす一方、後者は盛夏的な大気循環の強化をもたらす。本研究で示した結果は単一モデル (MRI-AGCM) の実験に基づくため、各要因のバランスに関する不確実性評価は今後の課題である。

## 引用文献

- Endo, H., and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1704–1710.
- Endo, H., A. Kitoh, T. Ose, R. Mizuta, and S. Kusunoki, 2012: Future changes and uncertainties in Asian precipitation simulated by multi-physics and multi-sea surface temperature ensemble experiments with high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric general circulation models (MRI-AGCMs). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D16118, doi:10.1029/2012JD017874.
- Endo, H., A. Kitoh, and H. Ueda, 2018: A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere. *SOLA*, 14, 57–63.
- Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta, and T. Ose, 2021: Different future changes between early and late summer monsoon precipitation in East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, 1501–1524.
- Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 663–671.
- Inoue, T., and H. Ueda, 2012: Delay of the Baiu withdrawal in Japan under global warming condition with relevance to warming patterns of SST. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 855–868.
- Kitoh, A., and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 247–258.
- Kitoh, A., H. Endo, K. Krishna Kumar, I. F. A. Cavalcanti, P. Goswami, and T. Zhou, 2013: Monsoons in a changing world: a regional perspective in a global context. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3053–3065.
- Kitoh, A., T. Ose, and I. Takayabu, 2016: Dynamical downscaling for climate projection with high-resolution MRI AGCM-RCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94A, 1–16.
- Kodama, Y.-M., 1993: Large-scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 581–610.
- Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2011: Dominant mode of climate variability, intermodel diversity, and projected future changes over the summertime western North Pacific simulated in the CMIP3 models. *J. Climate*, 24, 3935–3955.
- Kusunoki, S., 2018: Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2. *Climate Dyn.*, 51, 4601–4617.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 233–258.
- Mizuta, R., O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo, and A. Kitoh, 2014: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, 10, 167–171.
- Ose, T., 2019: Characteristics of future changes in summertime East Asian monthly precipitation in MRI-AGCM global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 317–335.
- Sampe, T., and S.-P. Xie, 2010: Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet. *J. Climate*, 23, 113–134.
- Wang, B., and LinHo, 2002: Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J. Climate*, 15, 386–398.
- Wang, B., Z. Wu, J. Li, J. Liu, C. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, 21, 4449–4463.
- Wang, B., C. Jin, and J. Liu, 2020: Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. *J. Climate*, 33, 6471–6489.
- Zhou, W. R. R. Leung, and J. Lu, 2022: Seasonally and

表 1 要因分析実験の設定

実験名	SST	GHG	その他 強制力	年数	アンサン ブル数
HP 現在		現在	現在	25	3
HF 将来		将来	将来	25	3
Exp1 現在		将来	現在	25	3
Exp2 全球で一様昇温 (+2.74°C)		現在	現在	25	3
Exp3 将来 (熱帯では一様昇温)		将来	将来	25	3
Exp4 将来 (北半球中高緯度では一様昇温)		将来	将来	25	3

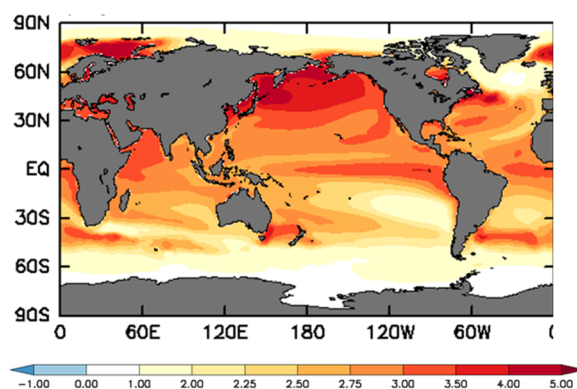


図 1 CMIP5 モデル平均の 21 世紀末 (RCP8.5 シナリオ) の SST 変化 (°C)。Mizuta et al. (2014) の Fig.2 より転載。

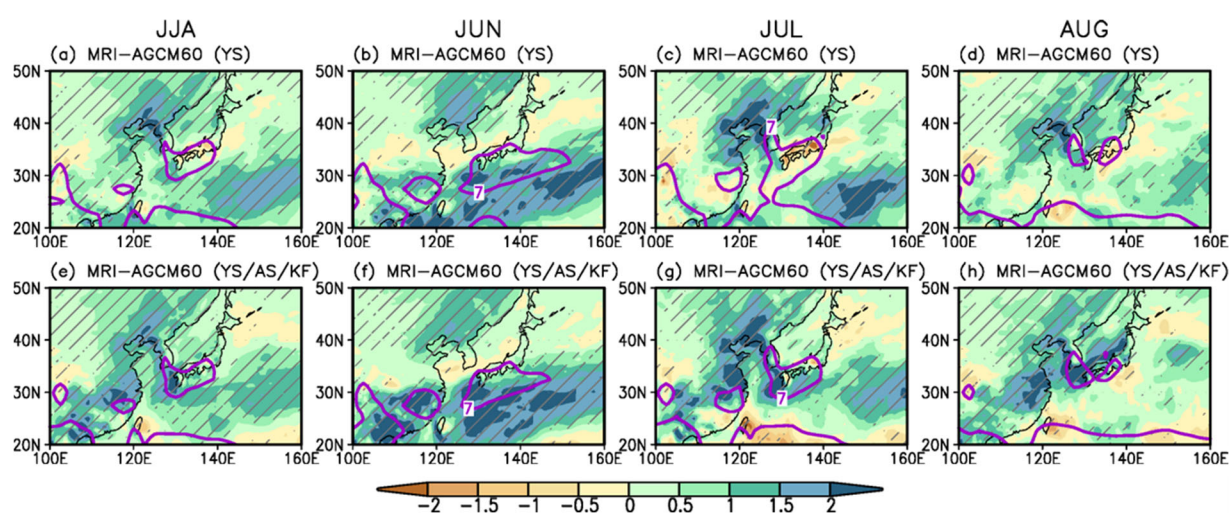


図 2 (a-d) SST アンサンブル予測実験、(e-h) SST・物理アンサンブル予測実験における 21 世紀末の降水量変化 (mm/d)。左から順に 6～8 月平均、6 月、7 月、8 月。現在気候の 7mm/d 等値線を太線で示す。将来変化符号のメンバー間一致率が 80%以上を斜線で示す。

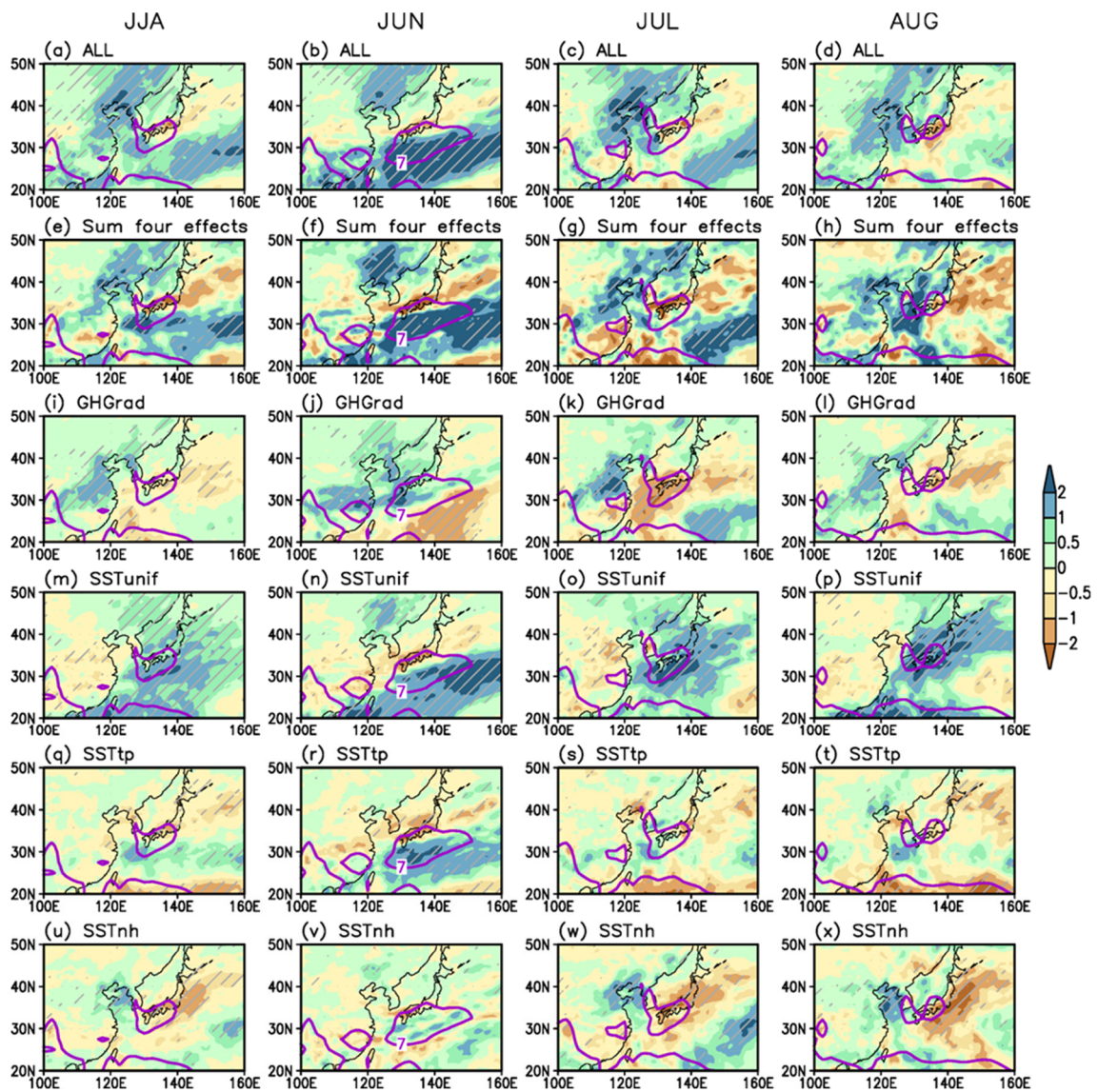


図3 感度実験における降水量変化 (mm/d)。(a-d) 将来変化 (HF-HP)、(e-h) 感度実験による各要因の総和、(i-l) GHG 増加 (Exp1-HP)、(m-p) SST 一様昇温 (Exp2-HP)、(q-t) 熱帯 SST パターン変化 (HF-Exp3)、(u-x) 北半球中高緯度 SST パターン変化 (HF-Exp4)。左から順に 6～8 月平均、6 月、7 月、8 月。現在気候の 7mm/d 等値線を太線で示す。信頼度 95%以上の偏差を斜線で示す。

U300 125-145Eav

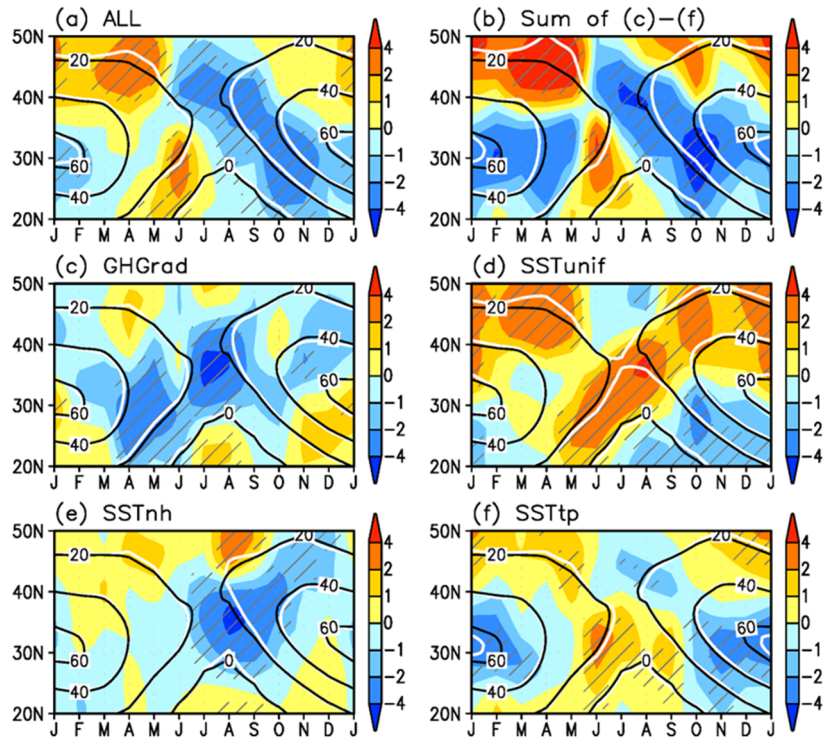


図4 125°E-145°E で平均した 300hPa 東西風 (m/s) の月・緯度断面図。

(a) 将来変化 (HF-HP)、(b) 感度実験による各要因の総和、(c) GHG 増加 (Exp1-HP)、(d) SST 一様昇温 (Exp2-HP)、(e) 北半球中高緯度 SST パターン変化 (HF-Exp4)、(f) 熱帯 SST パターン変化 (HF-Exp3)。感度実験の偏差を陰影で、現在気候 (感度実験) の等値線を黒線 (白線) で示す。信頼度 95%以上の偏差を斜線で示す。

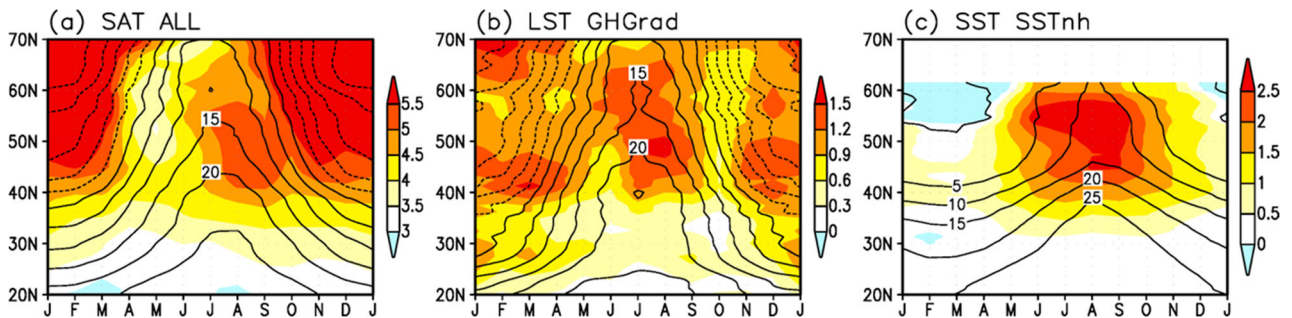


図5 100°E-160°E で平均した月・緯度断面図 (°C)。(a) 地上気温の将来変化 (HF-HP)、(b) GHG 増加による陸面温度偏差 (Exp1-HP)、(c) 北半球中高緯度 SST パターン変化による SST 偏差 (HF-Exp4)。現在気候値を黒線で示す。